

CORREÇÃO ESPECTRAL E ANÁLISE DA INSTABILIDADE TEMPORAL EM SIMULADOR SOLAR PARA ENSAIOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

André Luís Winck–andreluiswinck@gmail.com

Arno Krenzinger - arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGE3M, LABSOL, Escola de Engenharia.

Resumo. *Processos de fabricação eficientes e qualidade uniforme de células e módulos solares dependem de uma série de medidas de controle de qualidade. Para garantir uma adequada avaliação dos módulos são importantes o fator de instabilidade temporal e a correção de eventuais erros de descasamento espectral entre a célula de referência e o módulo sob teste. Neste contexto, a qualidade do simulador solar é de extrema importância e os fatores citados devem ser estudados para delimitar precisamente o grau de exatidão das medidas. O objetivo deste trabalho é apresentar a preparação do simulador SunSim 3C do LABSOL-UFRGS para a correção espectral através do uso de células de referência que tem a resposta espectral de cada tecnologia e também analisar se a instabilidade temporal é adequada para realizar ensaios atendendo às normas para este tipo de simulador. Para tal, foi adotada uma metodologia que permite medir com boa exatidão o valor da resposta da intensidade do flash de luz do simulador ao longo do tempo em cada célula de referência. Ao mesmo tempo, a montagem experimental permite registrar os dados da eletricidade produzida pelo módulo sob teste, estendendo a validade dos ensaios a um grande número de tecnologias sem a necessidade de interferência de cálculos para a correção do descasamento espectral.*

Palavras-chave: *Simulador Solar, Fator de Descasamento Espectral, Instabilidade Temporal.*

1. INTRODUÇÃO

Processos de fabricação eficientes e qualidade uniforme de células e módulos solares dependem de uma série de medidas de controle de qualidade. Para estimar a eficiência de células e módulos, são realizados testes com simuladores solares e uma classificação é feita. O monitoramento de qualidade do simulador solar é necessário para obter informações consistentes. Os simuladores solares pulsados prevalecem no mercado, pois fornecem algumas características únicas que faltam às fontes de luz contínua (Tec5, 2017). Por outro lado, seus pulsos curtos de menos de 15 ms são um desafio para a medição rápida, precisa e de alta resolução do pulso de irradiância. Consequentemente, são necessárias ferramentas com taxas de aquisição muito rápidas. Além disso, a classificação do flash, de acordo com suas propriedades espectrais, só pode ser realizada quando a intensidade atingir um nível estável. O tempo de estabilização pode variar dependendo do simulador solar e da própria lâmpada de flash. Conforme Ramos (2006), a variação da irradiância (instabilidade temporal) é minimizada nas medidas efetuadas em laboratório (indoor) com simulador solar, pois o sistema de *flash* é realimentado e mantém constante a irradiância. Neste contexto, a qualidade do simulador é de extrema importância e dois fatores importantes como o fator de descasamento espectral e a instabilidade temporal da irradiância não podem ser negligenciados, devendo ser estudados para delimitar precisamente o alcance dessas variáveis.

Os módulos fotovoltaicos apresentam diversas perdas intrínsecas do próprio conjunto tais como: reflexão na superfície frontal; sombra proporcionada pela área da malha metálica na face frontal; absorção nula de fótons com energia menor que o gap ($E_f < E_g$); recombinação dos portadores de carga; resistência elétrica no dispositivo e nos contatos metal-semicondutor (Pinho e Galdino, 2014).

O desempenho de células e módulos fotovoltaicos é associado às condições de teste padrão (*Standard Test Conditions – STC*), ou seja, nível de irradiância de 1000 W/m² ou também conhecido como 1 sol, distribuição espectral correspondente a AM1,5 e temperatura de célula de 25°C.

Os simuladores solares são classificados pela norma (IEC 60904-9ed 2, 2007). A norma relaciona três categorias de qualidade: casamento espectral, não uniformidade espacial e instabilidade temporal. Cada categoria é selecionada de acordo com três classes: A, B ou C. Uma avaliação precisa e periódica da instabilidade temporal da irradiância do simulador é de extrema importância para uma correta avaliação dos módulos fotovoltaicos testados. Neste sentido, mediante as ofertas de mercado e de experiências relatadas por pesquisadores da área, o LABSOL-UFRGS adquiriu um simulador solar “SunSim 3C”, fabricado pela empresa suíça PASAN. Foram levados em conta aspectos como o custo, a área iluminada de 2,0x2,0 m, suficiente para a maioria dos módulos comerciais existentes, a duração do pulso de luz (10 ms) e, principalmente as características espectrais, espaciais e temporais, excedendo a classificação AAA da norma IEC 60904-9, possibilitando a realização dos testes de conformidade para módulos fotovoltaicos exigidos pelo Instituto

Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e também facultando oportunidades para diversas pesquisas na área de energia solar (Souza *et al.*, 2012).

O simulador solar do LABSOL utilizava até agora, como referência, uma célula de silício monocristalino. Para outras tecnologias de fabricação de módulos, o simulador realizava correções do fator de descasamento espectral a partir da resposta espectral previamente definida pelo fabricante dos módulos e do espectro da fonte luminosa especificada pelo fabricante do simulador. Costa *et al.* (2016) examinaram a qualidade espectral da fonte luminosa do simulador do LABSOL utilizando novas células de referência com respostas espectrais para cada tecnologia. Nesse artigo concluiu-se que o uso das células de referência com resposta espectral equivalente ao módulo em teste é mais confiável do que a elaboração dos cálculos de correção por descasamento espectral.

No presente trabalho é realizada uma análise da instabilidade temporal do flash do simulador ao mesmo tempo em que todas as células de referência com diferentes respostas espectrais são utilizadas simultaneamente para medir a irradiância do simulador.

1.1 Fator de Descasamento Espectral

A Norma (IEC 60904-7, 2008- *Photovoltaic devices - Part7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices*) descreve os procedimentos para a correção do erro introduzido na caracterização de um dispositivo fotovoltaico causado pelo descasamento entre a distribuição espectral da radiação incidente utilizada no ensaio e o espectro de referência AM 1.5, tendo em conta a resposta espectral na célula de referência do dispositivo sob teste. Costa *et al.* (2016) apresentaram o procedimento e os cálculos necessários para corrigir os erros de descasamento espectral, demonstrando que ao usar as células de referência a correção espectral fica automaticamente realizada, mas para isto é necessário que estas células estejam instaladas e com medidas simultâneas, pois caso o módulo fotovoltaico apresente mais de uma junção PN com diferentes respostas espectrais, deve-se verificar qual a junção PN que possui a menor densidade de corrente no espectro medido. Como as camadas estão associadas em série, prevalece a menor das correntes encontradas.

1.2 Instabilidade Temporal da Irradiância

A irradiância (G) é uma grandeza que representa o fluxo da radiação incidente por unidade de área sendo obtida pela integral da distribuição espectral (λ). A Eq. (1) mostra como a corrente de curto circuito (I_{SC}) de um módulo relaciona-se com a irradiância:

$$I_{sc} = I_{sc}(STC) * \frac{G}{G(STC)} \quad (1)$$

onde:

$I_{sc}(STC)$ é a corrente de curto circuito na STC (*Standard Test Conditions*).

G é a irradiância medida.

$G(STC)$ é a irradiância na condição STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$).

Correntes de curto-circuito em uma célula fotovoltaica devem ser medidas em tensão zero, usando uma carga variável (preferencialmente eletrônica), balanceando a tensão e drenando-a através de uma resistência série externa. Alternativamente, elas podem ser determinadas pela medição de tensão através de um resistor de precisão fixo de 4 terminais, permitindo que a medida seja realizada com polarização próxima ao ponto de curto circuito (a menos de 3% da tensão de circuito aberto do dispositivo) (Ramos, 2006).

A Instabilidade Temporal é uma medida da estabilidade da intensidade da irradiância ao longo de um período de tempo. A determinação da instabilidade temporal é feita a partir da medida da irradiância do feixe do simulador durante um período de tempo especificado e então a instabilidade é calculada pela norma IEC 60904-9 usando a Eq. (2):

$$\text{Instabilidade temporal (\%)} = \left[\frac{G_{max} - G_{min}}{G_{max} + G_{min}} \right] \times 100 \% \quad (2)$$

onde:

G_{max} é a irradiância máxima

G_{min} é a irradiância mínima

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

Células. Foram utilizadas no LABSOL-UFRGS seis modelos de células de referência, da marca Konica Minolta, com várias respostas espectrais correspondentes a diferentes tecnologias de células fotovoltaicas. Na Tab. 1 são apresentados os valores das correntes de curto-circuito dos certificados de calibração de seis modelos de célula fornecidos pelo fabricante, e a tecnologia representativa. Na Fig. 1 estão representadas as respectivas respostas espectrais.

Tabela 1- Referência e corrente de curto circuito de calibração das células (Konica Minolta)

Células	Corrente Curto Circuito (I_{SCref})	Aplicação
AK-100	44,56mA	Células solares de dupla junção:aSi- μ Si (camada superior a-Si)
AK-110	15,92 mA	Células solares de dupla junção:aSi- μ Si (camada inferior μ c -Si)
AK-120	24,01 mA	Células solares de tripla junção (camada superior a-Si)
AK-130	17,06 mA	Células solares de tripla junção (camada intermédia a-Si)
AK-140	13,18 mA	Células solares de tripla junção (camada inferior a-Si)
AK-200	132,32 mA	Células solares de m-Si

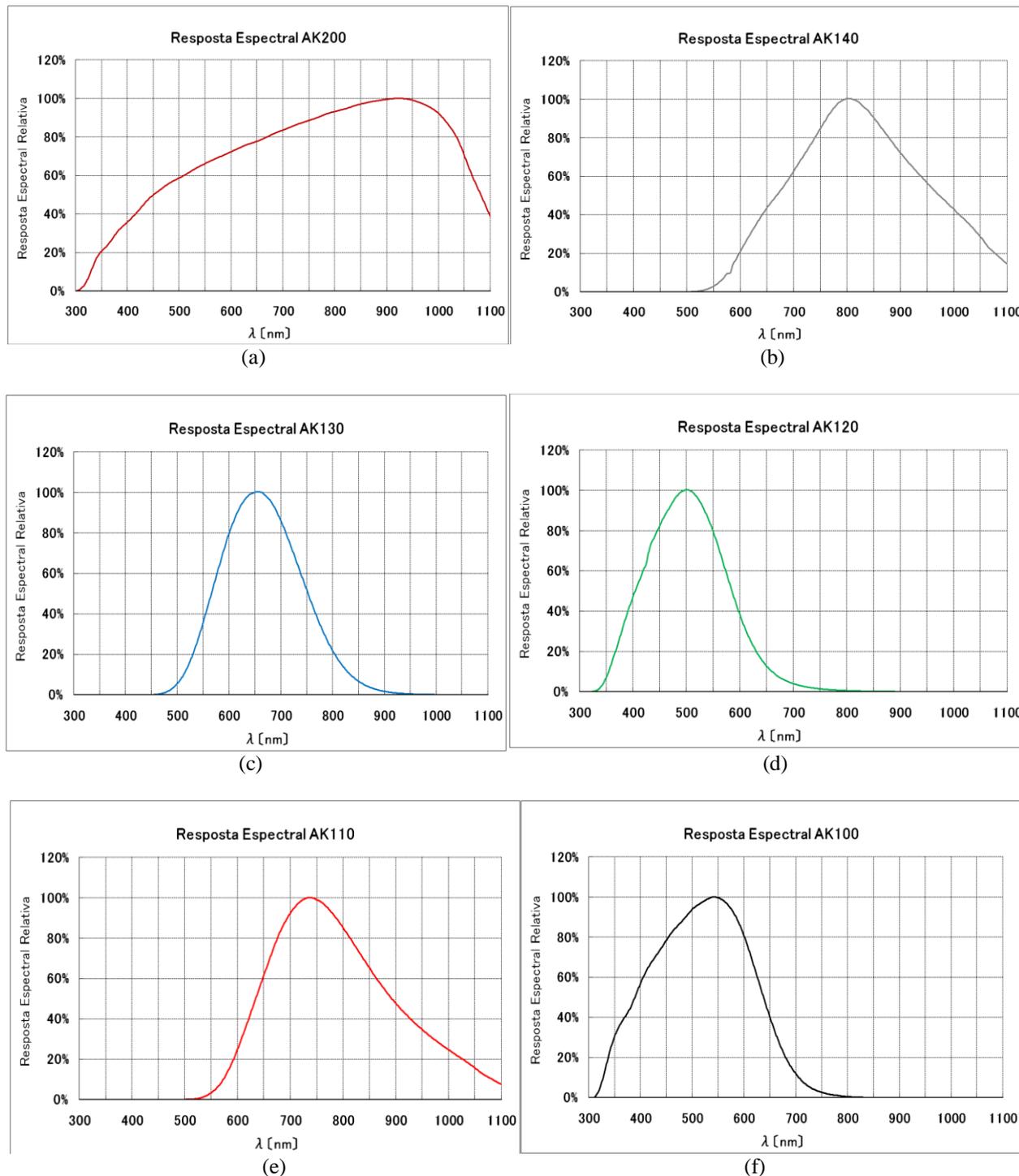


Figura 1 - Respostas espectrais relativas das células de referência (a) AK-200,(b) AK-140, (c) AK-130, (d) AK-120,(e) AK-110 e (f) AK-100 da Konica Minolta.

Simulador Solar. O simulador solar SunSim 3C, fornecido pela PASAN, (Meyer Burger Group), é um sistema composto por diversas partes, entre elas: túnel, caixas das lâmpadas, fonte de potência e célula de referência. Uma descrição completa deste sistema, incluindo como foi montado o túnel, pode ser encontrada em Hincapie, C. *et al.*, (2014). Os motivos pela escolha deste simulador são descritos com detalhes em Souza *et al.*, (2012), mas pode-se citar as características da fonte luminosa, superando todos os requisitos da norma internacional (IEC 60904-9, 2007 *Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements*) sendo classificado como A+A+A+, e cujas características básicas estão apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2- Classificação do modelo SunSim 3C de acordo com a IEC 60904-9

NORMA	CLASSE - AAA	SunSim3C - A+A+A+
Não uniformidade espacial	$\leq 2 \%$	$\leq 1,0\%$
Instabilidade temporal (LTI)	$\leq 2 \%$	$\leq 1,0\%$
Casamento espectral	$\leq \pm 25\%$	$\leq \pm 12,5 \%$

Multímetros. Para aferição das resistências dos *shunts* das células de referência foram utilizados multímetros da marca Agilent modelo 34411A com resolução máxima 6½ dígitos e tempo de integração para a medida de tensão DC de 100µs.

Digitalizadores. Para medição com alta taxa de aquisição das correntes de curto-circuito das células de referência e da corrente e tensão do módulo fotovoltaico em teste no simulador, utilizaram-se dois digitalizadores da marca Keysight modelo L4534A, com quatro canais de amostragem simultânea de 16 bits em cada digitalizador e capacidades de medição de ± 250 mV até ± 250 V em AC ou DC e três opções de filtro passa baixa em cada canal (2 Mhz, 2 KHz e 200 kHz). Possui também capacidade de registrar amostras na velocidade de até 20 MSa/s e memória de 32 MSa/ch.

2.2 Procedimentos experimentais

A distribuição temporal da intensidade da lâmpada de flash (instabilidade temporal da irradiação) é realizada medindo-se a intensidade em intervalos definidos. Os dados podem ser usados para determinar o nível estável do flash. Os tempos de integração de pelo menos 10 µs permitem medições de alta resolução e dão uma taxa de amostragem suficiente para monitorar os perfis de intensidade ao longo do tempo. Os dados adquiridos podem ser usados para a qualificação e classificação dos simuladores solares pulsados. A visualização do comportamento temporal é alcançada através da avaliação das intensidades de corrente de curto circuito das células de referência.

As correntes de curto circuito das células de referência foram determinadas pela medição de tensão através dos resistores *shunt* de precisão. Os *shunts* foram montados com resistores de precisão de 0,01% e estabilidade térmica de 200 ppm/°C, dimensionados para manter cada célula de referência na corrente próxima de curto circuito com tensão em torno de 10 mV. Neste valor de tensão, considera-se que a tensão é zero e que a corrente da célula é a própria corrente de curto circuito.

Como foi visto, para resolver a Eq. (2) são necessários 2 valores: a irradiância máxima e a irradiância mínima do simulador e isto foi determinado a partir de cada célula sob teste. Por meio da digitalização das tensões nos *shunts* das células de referência, foram realizadas medições em 16 bits, na velocidade de amostragem de 5MSa/sec, e realizadas médias de cada 100 aquisições, resultando em uma taxa efetiva de amostragem de 50 kSa/s. Para avaliação da estabilidade foram comparadas as medições máximas e mínimas obtidas pelas médias dos digitalizadores ao longo do tempo do pulso, em torno de 10 ms.

Cada canal do digitalizador mede simultaneamente com os outros canais a corrente de curto circuito de cada célula de referência obtendo-se 350 valores médios em menos de 12 ms. Simultaneamente a irradiância instantânea do simulador é registrada por outra célula de referência ligada ao sistema do simulador, (modelo CH-2000 Neuchâtel, m-Si, sensibilidade de 134,50 mA), sendo que a taxa de amostragem das medições desta célula é também da ordem de 350 pontos durante o pulso de 10 ms.

Ligou-se o sinal de cada *shunt* em um canal diferente de um conjunto de dois digitalizadores (A e B) da marca Keysight de 16 bits modelo L4534A, totalizando seis canais (um para cada célula padrão de referência), canais 1 a 4 do digitalizador A e canais 1 e 2 do digitalizador B. Em cada canal configurou-se um *trigger* para leitura de borda de subida a partir de um sinal de 0,005 V, quantidade de amostras de 5 MSa/sec e filtro de sinal do tipo passa-baixas com pólo em 200 kHz. No caso do módulo fotovoltaico em teste no simulador, ligaram-se em ponte os dois fios de tensão do simulador, que vão até o módulo, com o canal 4 do digitalizador A. Para medição de corrente do módulo em teste, utilizou-se um *shunt* comercial aferido de 299,44 mV para cada 10 amperes, ligado em série com o fio de corrente do simulador que vai até o módulo. O sinal deste *shunt* foi ligado no canal 3 do digitalizador B. O canal 3 do digitalizador B (medição da corrente do módulo em teste) foi configurado para ± 1 V e o canal 4 do digitalizador B (medição da tensão do módulo em teste) foi configurado para ± 64 V. Estas configurações possibilitaram a leitura sincronizada das respostas das seis células de referência e do módulo em teste, ligados nos canais dos digitalizadores A e B, com o pulso de *flash* do simulador.

Os digitalizadores foram conectados, através de sua porta de rede, a um roteador para conexão com computador. Cada digitalizador gera automaticamente um endereço IP para acesso ao software *build in*. A Fig. (2) mostra o diagrama esquemático do experimento.

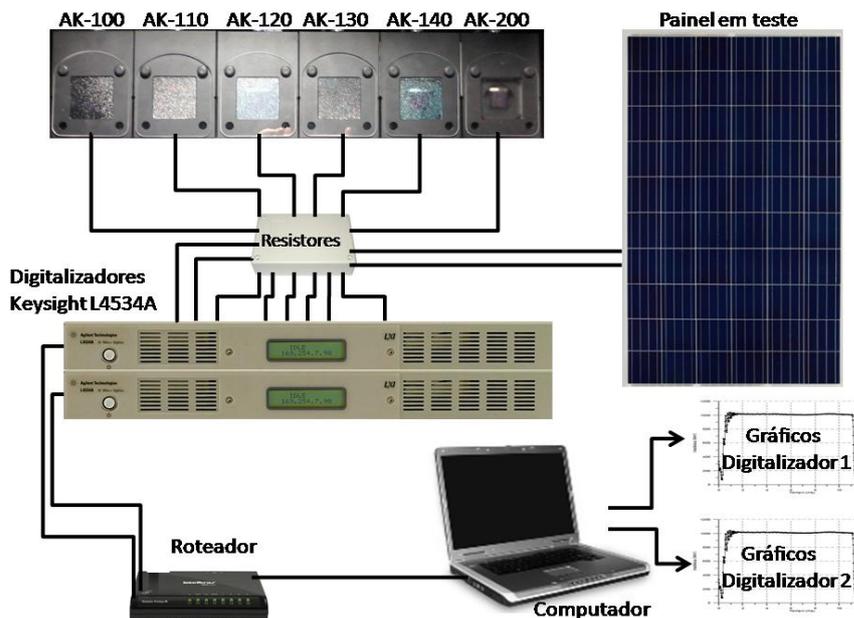


Figura 2–Diagrama esquemático do experimento para avaliação da instabilidade temporal do simulador.

Ao mesmo tempo em que a irradiância é avaliada por cada uma das células ao longo do pulso do *flash*, também é possível realizar uma avaliação da estabilidade da intensidade da luz. Para a avaliação das medições realizadas no simulador considerou-se a faixa de tempo onde as medições foram estáveis (de 2,5 ms até 9,5 ms). Os valores apresentados são valores de 350 médias de 20 μ s cada (100 aquisições), realizadas pelos digitalizadores, na faixa de tempo de 7ms efetivos no total.

Quando se varia a irradiância que incide em uma célula fotovoltaica, polarizada próximo de seu ponto de curto circuito, a corrente produzida varia na mesma proporção. Desta forma, a corrente de cada célula de referência, medida pelos digitalizadores através de *shunts* de 10 mV, revela a sequência temporal da irradiância durante o pulso do *flash*. O exame deste comportamento permite analisar a estabilidade da iluminação do simulador. A presença de ruído ao longo da medição eletrônica existe, mas é minimizado ao se realizar a média de cada 100 aquisições para a determinação da irradiância correspondente a cada tecnologia e sua flutuação ao longo do tempo. Obtém-se assim uma sequência de cerca de 350 pontos de irradiância, de onde se pode extrair os valores máximo e mínimo necessários para a avaliação da instabilidade temporal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados experimentais da avaliação da instabilidade temporal da irradiância do simulador.

3.1 Resultados teóricos e experimentais

Segundo os dados do fabricante do simulador, a instabilidade temporal deve ser menor que 1 %. Com as curvas digitalizadas, os cálculos das médias e dos desvios padrão de 35000 amostras de sinal para cada célula ensaiada e os cálculos da Eq. (2) efetuados, os resultados da instabilidade temporal mostram-se adequados para este tipo de simulador. A coluna identificada como instabilidade temporal indica os resultados da Eq. (2) a partir das medidas brutas com os digitalizadores, filtradas com médias realizadas em janelas (350 pontos de 100 aquisições cada). Durante o mesmo disparo do flash o sistema de aquisição de dados da célula do próprio simulador solar PASAN também registra cerca de 350 pontos de irradiância, com um valor máximo de 1005 W/m² e um valor mínimo de 1000 W/m², correspondendo a uma instabilidade de 0,25%. Estes resultados aparecem na Tab. 3.

Existe uma incerteza associada a cada calibração no "*Test Report*" correspondente a cada célula de referência, esta incerteza é de 1,7%. No entanto supõe-se que no conjunto de células de mesma origem, com técnicas de calibração do mesmo tipo, as incertezas relativas entre as mesmas sejam bem menores. Nos valores da Tab. 3 não foram consideradas incertezas experimentais baseadas nas incertezas dos instrumentos e células, ou seja, os resultados foram apresentados ignorando esta possibilidade.

Tabela 3 – Valores da média e desvio padrão da tensão medida e resultado da Eq. (4) para as células de referência AK-110, AK-120, AK-200, AK-140, AK-130 e AK-100.

Célula padrão	Média de 350 medições	Desvio padrão de 350 medições	Instabilidade temporal experimental	Instabilidade temporal das aquisições do simulador
AK-110 ($\mu\text{c-Si}$)	15,88 mA	$9,390 \times 10^{-6} \text{A}$	0,17%	0,25%
AK-120 (a-Si)	25,67 mA	$7,898 \times 10^{-5} \text{A}$	0,60%	
AK-200 (mc-Si)	135,9 mA	$1,456 \times 10^{-4} \text{A}$	0,25%	
AK-140 (a-Si)	13,07 mA	$9,223 \times 10^{-6} \text{A}$	0,17%	
AK-130 (a-Si)	18,81 mA	$1,081 \times 10^{-5} \text{A}$	0,19%	
AK-100 ($\mu\text{c-Si}$)	46,08 mA	$1,227 \times 10^{-4} \text{A}$	0,51%	

Foram obtidas seis curvas apresentadas na Fig. 3 demonstrando um perfeito funcionamento da lâmpada do *flash* e uma instabilidade temporal da irradiância muito boa do simulador para todas as sensibilidades espectrais relativas das células padrão de referência, ou seja, para uma irradiância de 1000 W/m^2 tem-se uma resposta estável de cada uma das células de referência, com corrente bem próxima à respectiva corrente de curto circuito, durante toda a duração do pulso de *flash* de aproximadamente 11 ms.

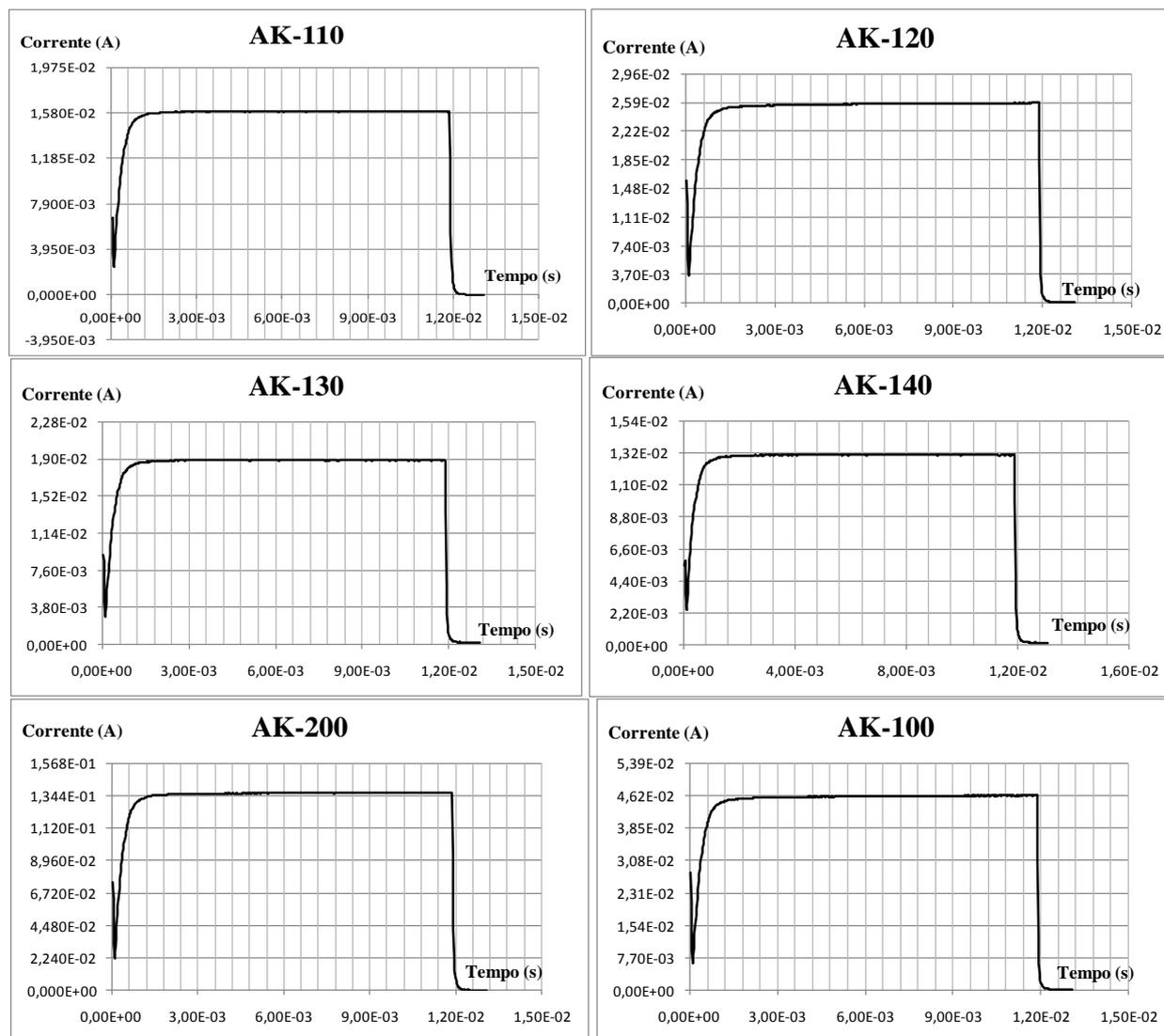


Figura 3–Curvas de corrente de curto-circuito *versus* tempo das células de referência AK-100, AK-110, AK-120, AK-130, AK-140 e AK-200 da Konica Minolta.

Evidentemente não se esperava que a instabilidade fosse ser notada de forma diferente para cada resposta espectral. A instalação de todas as células foi preparada para equipar o simulador solar e, para alguns casos, é imprescindível que pelo menos 3 células de referência estejam em operação simultânea. Supõe-se que havendo qualquer variação de intensidade no pulso do flash, não haverá variação significativa de distribuição espectral. Mesmo assim o estudo foi realizado para cada célula de referência de forma independente, posto que as mesmas já estavam instaladas. As diferenças observadas e relatadas na Tab. 3 podem ocorrer devido a diferentes ruídos eletrônicos na leitura dos canais dos digitalizadores, mas como estes ruídos somente tenderiam a aumentar os resultados de instabilidade, não afetam as conclusões.

Simultaneamente com as aquisições dos dados de irradiância por cada célula de referência, foram também adquiridos os dados de corrente e tensão do módulo ensaiado (módulo de silício policristalino com 60 células, $I_{sc} = 9,11$ A, $V_{oc} = 37,95$ V e $V_{mp} = 30,92$ V). As Figs. 4 e 5 mostram os resultados obtidos com este ensaio. A obtenção de um conjunto de pontos sincronizados com as medidas de irradiância e adquiridos de forma independente e de alta confiabilidade permite uma segunda fonte de medição de dados para a curva característica dos módulos. No caso de módulo de múltiplas junções, este sistema de aquisição de dados garante o registro da irradiância efetiva para cada camada semicondutora, mesmo que houvesse uma maior instabilidade na intensidade durante o traçado da curva.

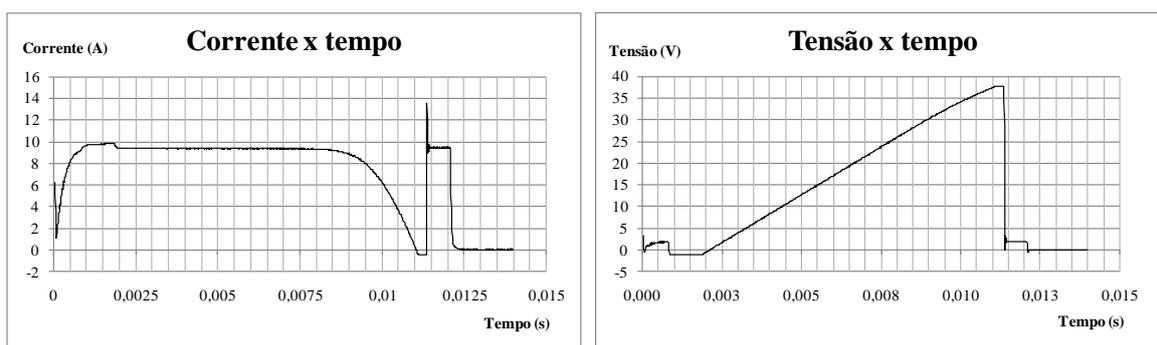


Figura 4—Curvas corrente x tempo e tensão x tempo de módulo de silício policristalino de 60 células em teste no simulador, medido no digitalizador B de forma sincronizada com o flash e as células de referência.

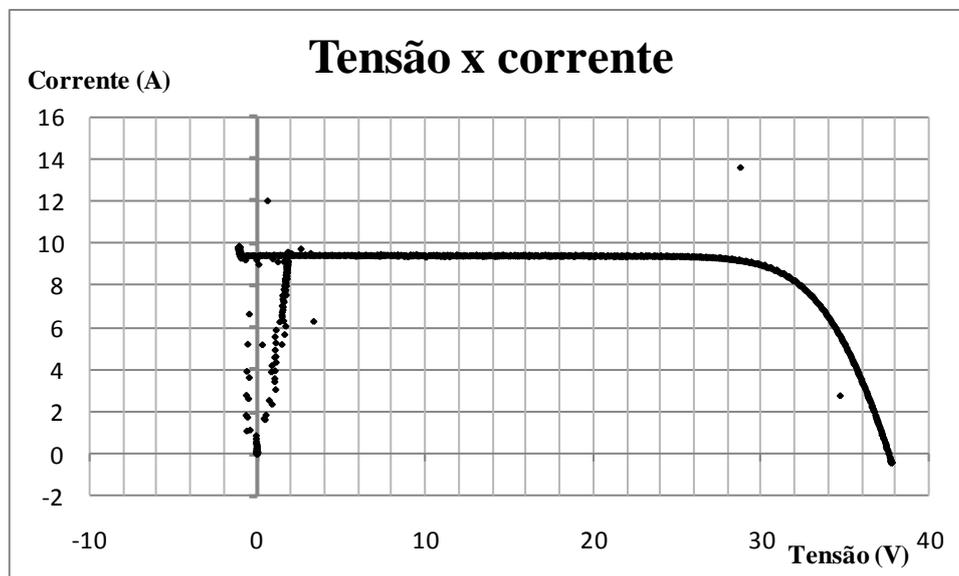


Figura 5—Curva bruta de tensão x corrente de módulo de silício policristalino de 60 células em teste no simulador, medido no digitalizador B de forma sincronizada com o flash e as células de referência.

A Tab. 4 mostra um resumo dos resultados obtidos nas medidas de irradiância realizada através dos digitalizadores e das células de referência. Foi disparado novo pulso de flash no simulador, ajustado para que a irradiância comprovasse 1000 W/m^2 pela medida da referência AK200, de silício monocristalino. Na Tab. 4 são apresentados os valores das resistências aferidas nos *shunts* fabricados, o valor médio da queda de tensão nos *shunts* e sua respectiva corrente de curto circuito para cada célula. Conforme a calibração das células com o espectro padrão, encontram-se

diferentes valores de irradiância efetiva para cada resposta espectral, sendo que a última coluna mostra o percentual de correção que deveria ser aplicado nas correntes de módulos correspondentes a cada tecnologia.

Tabela 4 – Correção dos valores de corrente, do módulos em teste, para as respectivas tecnologias representadas pelas células de referência AK-110, AK-120, AK-200, AK-140, AK-130 e AK-100.

Célula de referência.	Valor da resistência do shunt construído e aferido (Ω)	Tensão média no shunt de cada célula em 350 medições (mV)	Corrente Isc medida (mA) correspondente	Irradiância (W/m^2)	Correção da Isc (%)
AK-200	0,0822	10,8776	132,33	1000	-0,01
Ak-140	0,7583	9,6542	12,73	966	3,40
AK-130	0,576	10,5511	18,32	1074	-7,37
AK-100	0,2284	10,2513	44,88	1007	-0,72
AK-110	0,6342	9,8079	15,46	971	2,86
AK-120	0,4209	10,5234	25,00	1041	-4,13

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a instalação de um conjunto de células de referência correspondentes a diferentes tecnologias fotovoltaicas, com um sistema de digitalização dos sinais medidos em até oito canais que permite a determinação simultânea da irradiância efetiva para cada tecnologia fotovoltaica. Um trabalho anterior mostrou que a correção devido ao descasamento espectral, pelo fato de que a distribuição espectral da fonte luminosa não ser exatamente aquela esperada, poderia levar a alguns erros importantes de medição (no caso de não se usarem células de referência de mesma tecnologia do módulo sob teste). Com este aperfeiçoamento, o uso do simulador solar SunSim 3C em combinação com a instalação realizada permite agora realizar ensaios de módulos com respostas espectrais diferentes, sem a necessidade de calcular o fator de correção espectral.

Os ensaios permitiram avaliar a instabilidade temporal da irradiância ao longo do pulso do *flash*. Apesar de que não se espere que a instabilidade seja diferente para cada resposta espectral, o estudo foi realizado para cada célula de referência de forma independente, demonstrando que o simulador supera as especificações do fabricante (< 1%), pois em todos os ensaios a instabilidade ficou entre 0,17% e 0,60%.

O fato de ter um sistema de aquisição de dados de alta taxa de aquisição atuando simultaneamente com os equipamentos do próprio simulador, também permitiu a aquisição dos dados para medir a característica IV do módulo, obtendo-se um conjunto de pontos sincronizados com as medidas de irradiância e adquiridos de forma independente e de alta confiabilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro. O LABSOL é um laboratório associado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia, INCT-EREEA.

REFERÊNCIAS

Costa, E. R., Defferrari, C. S., Krenzinger, A. Qualificação Espectral de Simuladores Solares para Ensaios de Módulos Fotovoltaicos, Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia Solar – Belo Horizonte, abril de 2016.

- Ramos, C.M., 2006. “ Procedimentos para Caracterização e Qualificação de Módulos Fotovoltaicos”, Dissertação de mestrado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.
- Gasparin, F. P., Buhler, A. J. e Krenzinger A., 2012. “Análise da Importância do Fator de Descasamento Espectral na Caracterização Elétrica de Módulos Fotovoltaicos”. In: IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES, São Paulo.
- Hincapie, C.; *etal.*, “Estudo e Montagem de Túnel para Simulador Solar”, V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, 2014.
- IEC, 2007. Norma IEC 60904-9 Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements, International. Electrotechnical Commission.
- IEC, 2008. Norma IEC 60904-7 Photovoltaic devices - Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices, , International. Electrotechnical Commission.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A. “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos” Grupo de trabalho de Energia Solar GTES CEPEL – DTE – CRESESB, Rio de Janeiro, 2014.
- Souza, R. B., Prieb, C. W. M., Krenzinger, A., 2012 Análise de Simuladores Solares para Ensaios de Módulos Fotovoltaicos IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES – São Paulo.
- Tec5. “UV/VIS/NIR Spectrometer for Qualification of Pulsed Solar Simulators”. Application Notes – MultiSpec System Vol. 37. Germany.

SPECTRAL MISMATCH CORRECTION AND ANALYSIS OF TEMPORAL INSTABILITY IN SOLAR SIMULATOR FOR PHOTOVOLTAIC MODULES TESTS

Abstract. *Efficient manufacturing processes and uniform quality of cells and solar modules depend on a number of quality control measures. To ensure an adequate evaluation of the modules, the temporal instability factor and the correction of spectral mismatch errors between the reference cell and the module under test are important. In this context, the quality of the solar simulator is of extreme importance and the cited factors must be studied to precisely delimit the accuracy of the measurements. The objective of this work is to present the preparation of the LABSOL SunSim 3C simulator for the spectral correction through the use of reference cells with the spectral response of each technology. At the same time, the measurements are used to analyze if the temporal instability is suitable to perform tests according to the norms. The adopted methodology allows to measure with good accuracy the simulator light flash intensity along the time, for each reference cell. At the same time, the experimental setup allows to record the data of the electricity produced by the module under test, extending the validity of the tests to a large number of technologies without the need of performing calculations for the correction of the spectral mismatch.*

Keywords: *Solar Simulator, spectral mismatch error, temporal instability*